

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Diseño de una “substrate Integrated Waveguide” antena usando metasuperficies



Máster Universitario en  
Ingeniería de Telecomunicación

Trabajo Fin de Máster

Javier Chocarro Álvarez

Iñigo Ederra Urzainqui

Pamplona, 03/07/2020



"Resistiré"



## Índice

<b>Agradecimientos</b> .....	7
<b>Capítulo 1. Estado del Arte y objetivos</b> .....	9
1.1. SIW .....	9
1.2. Metamateriales .....	10
1.3. SWA (“Slotted Waveguide Antenna”).....	11
1.4. Objetivos .....	13
<b>Capítulo 2. Cálculos y estructura principal</b> .....	15
2.1 Diseño de la SIW.....	15
2.2 Calculo de la longitud de onda en la guía .....	17
<b>Capítulo 3. SIW como antena de guía ranurada</b> .....	21
3.1. Cálculo de la conductancia .....	21
3.2. Diseño de la Antena .....	23
<b>Capítulo 4. Implementación de la metasuperficie.</b> .....	27
4.1. AJUSTE DE LA METASUPERFICIE .....	27
4.2. Cálculo de la conductancia .....	31
4.3. Diseño de la Antena con la metasuperficie .....	33
<b>Capítulo 5. Comparaciones</b> .....	35
<b>Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras</b> .....	39
6.1. Conclusiones .....	39
6.2. Líneas futuras .....	40
<b>Capítulo 7. Bibliografía</b> .....	41



## Agradecimientos

Quisiera empezar dando las gracias a todos los profesores que me han ayudado y enseñado a lo largo de estos años en el máster. En especial a todos los que componen el grupo de antenas en el que he tenido la suerte de poder trabajar y colaborar en varios proyectos mientras realizaba el TFM. Y por ello doy gracias al Dr. Jorge Teniente y Dr. Iñigo Ederra.

No me olvido de mis compañeros de sala y de almuerzo: Alexia, Carlos, Dayan, Biurrun, Iñigo, Irati, José y Alicia, os doy las gracias a todos por hacer más ameno el día a día.

También agradecer a mi familia, la constancia de repetirme una y otra vez que acabe el trabajo fin de máster. Gracias, mamá y papá. A este paso, mi hermano Diego me iba a adelantar en la carrera. Gracias a mi hermana Angela que me enseña a ser más ordenado cada día. Y sobre todo gracias, Irune, por haber aguantado toda la cuarentena mis quejas y, sobre todo, haberme dado el último empujón estos días.

Finalmente, y de nuevo, gracias, Iñigo, por haberme ayudado, guiado y aguantado a lo largo del TFM, intuyo que no ha sido tarea fácil.





## Capítulo 1. Estado del Arte y objetivos

En este capítulo haremos un resumen y explicaremos las tecnologías que usaremos a lo largo del trabajo. La más relevante es la SIW, y también los metamateriales. Comenzaremos hablando un poco del estado del arte y después concretaremos los objetivos de este estudio.

### 1.1. SIW

El siglo XX fue un gran auge para tecnologías que siguen siendo de uso hoy en día, guías de onda, microstrip, etc. A principios de la década de los 90 se ideó una nueva forma para poder guiar las ondas usando sustratos con vías metálicas, se conocen como guías de onda integradas en sustrato o SIW (del inglés “Substrate integrated waveguide”) [1] [2]. Estas nos permiten guiar la onda con una tecnología más plana que las guías de onda tradicionales, y debido a que la onda viaja por un sustrato podemos reducir en dimensiones ya que la longitud de onda dentro de la guía se acorta.

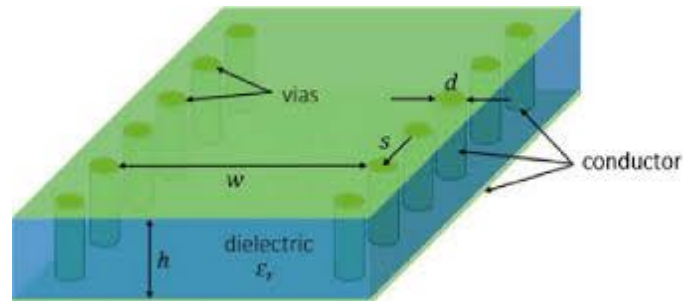


Figura 1: Esquema de una SIW, mostrando sus parámetros principales.

Mediante el uso de esta tecnología podemos diseñar redes de alimentación, vemos un ejemplo en [3] donde se realizan unos divisores para una futura implementación en el 5G. Aquí vemos el divisor de potencia diseñado:

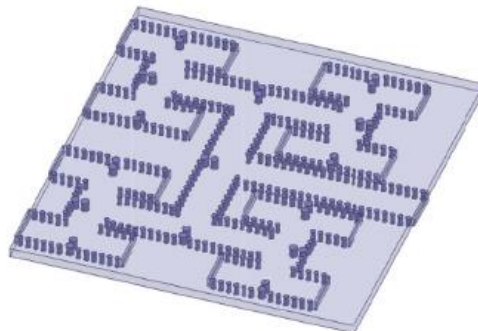


Figura 2: Divisor en tecnología SIW, perteneciente al artículo [8]

Con esta tecnología también podemos realizar filtros como podemos ver en la figura 3, y también diseñar diferentes tipos de antenas. Como en el caso [4] donde vemos como con unas cavidades en la SIW consiguen realizar antenas y arrays de antenas.

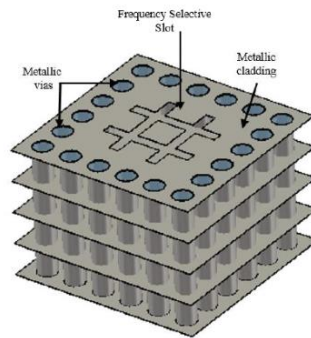


Figura 3: Estructura FSS del artículo [8] donde usan cavidades en la SIW.

Una antena que se puede diseñar en SIW es la ranurada, la idea es similar a la SWA (“Slotted Waveguide Antenna”) que explicaremos a lo largo de este capítulo. Es en este último caso en el que nos centraremos en este TFM, donde diseñaremos una antena SIW tradicional y una antena SIW con una metasuperficie. Pero primero comentaremos que son estas estructuras.

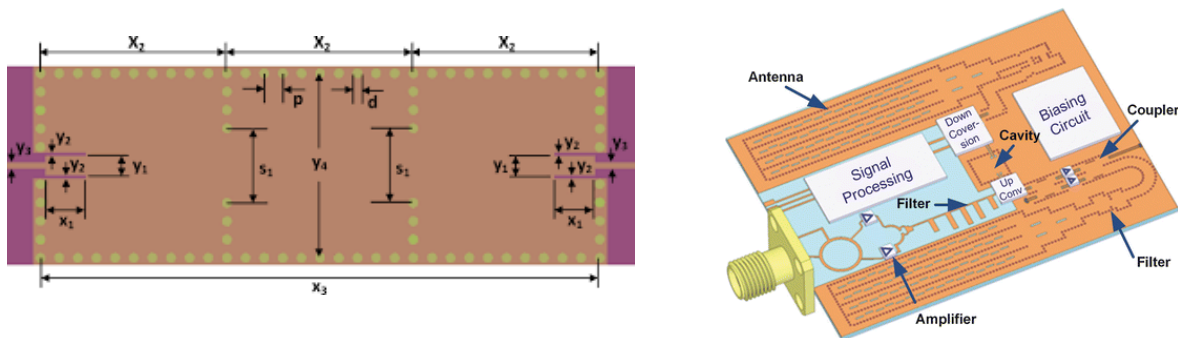


Figura 4: Filtro usando SIW (Izda.); Sistema de recepción donde se aprecia el uso de SIW en antenas, filtros... (dcha.)

## 1.2. Metamateriales

En 1968, Veselago [5], el padre de los metamateriales, propuso por primera vez un medio con permitividad y permeabilidad negativas, y descubrió que estos medios tienen características muy interesantes, como el índice de refracción negativo. Aunque no existe una definición concreta de metamateriales, se ha estandarizado el concepto de que es una estructura formada por diferentes materiales con una distribución determinada y que gracias a eso ofrecen unas propiedades particulares que no se encuentran en la naturaleza.



*Figura 5: Lente realizada con metamateriales, en la UPNA*

Los metamateriales se conforman por celdas unidad repetidas periódicamente, fabricados mediante inclusiones de metal y dieléctricos. Estas estructuras acaban comportándose como resonadores de tamaño mucho menor que las longitudes de onda en la que operamos. En el trabajo estudiaremos las versiones planas de los materiales, también llamados metasuperficies.

### 1.3. SWA (“Slotted Waveguide Antenna”)



*Figura 6: Antena SWA con una metasuperficie [7]*

La idea del TFM es realizar una antena ranurada en guía SIW, para ello vamos a explicar brevemente las antenas de guía de onda ranurada o SWA. Este tipo de antenas consisten en realizar una serie de ranuras a lo largo de la guía de tal manera que en ellas se cree un campo eléctrico y magnético. Las ranuras se colocan a una distancia entre sí de  $\lambda_g/2$

y la última ranura se coloca a  $\lambda_g/4$  del cortocircuito que se colocará en el extremo de la guía. El cortocircuito hará que retorne la onda, y así se cree una onda estacionaria. Las ranuras están situadas donde se encuentran los máximos de nuestra onda. Podemos ver estas antenas como un modelo de línea de transmisión, donde las resistencias son las ranuras.

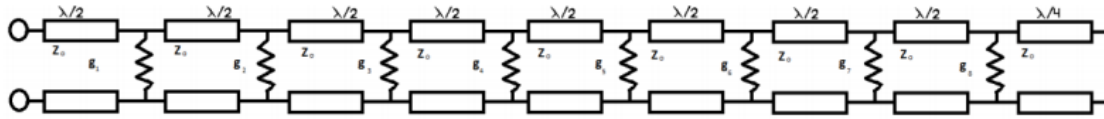


Figura 7: Modelo de transmisión de una antena de guía ranurada [1].

La posición de las ranuras respecto al centro de la guía marca el nivel de excitación relativo de ellas. Para facilitar los cálculos, que mostraremos a continuación, usaremos conductancias (“parte real de la admitancia”) en lugar de resistencias, esto es así ya que tenemos un modelo de transmisión con resistencias en paralelo. Para poder llegar a tener adaptada la antena, tenemos que cumplir ciertas equivalencias que mostramos a continuación. Estas equivalencias también se muestran en [6] y [7].

1. La conductancia total es el sumatorio de todas las ranuras.

$$g_t = \sum_{n=1}^N g_n \quad [1]$$

2. La conductancia de cada ranura viene dada por el producto de una constante por el cuadrado del nivel de excitación relativa deseada en dicha ranura.

$$g_n = K a_n^2 \quad [2]$$

3. El producto de la constante por el sumatorio del cuadrado de los niveles de excitación relativos a cada ranura deberá ser igual a 1.

$$K \sum_{n=1}^N a_n^2 = 1 \quad [3]$$

Con estas ecuaciones podremos resolver cualquier problema de diseño para este tipo de antenas ranuradas, sea en tecnología SWA como en tecnología SIW. Con esto concluimos el estado del arte y damos paso a comentar los objetivos.

## 1.4. Objetivos

Visto el estado del arte, los objetivos de este trabajo de fin de máster son el estudio, diseño y simulación de una antena basada en la tecnología SIW del inglés (“substrate integrated waveguide”), concretamente se realizará una antena SIW de 8 ranuras con una distribución uniforme, a la frecuencia de 24 GHz, (frecuencia muy usada para tecnología RADAR) y posteriormente se comparará con otra realizada de la misma forma, pero esta vez usando una metasuperficie que nos permita mejorar el diagrama de radiación haciéndola más directiva.

Todas las simulaciones se harán usando herramientas de software como HFSS y EMPro.

### **Keywords:**

Antena, Metamaterial, Slotted Waveguide Antenna, Substrate Integrated Waveguide, Metasuperficie enhanced Substrate Integrated Antena



## Capítulo 2. Cálculos y estructura principal

### 2.1 Diseño de la SIW

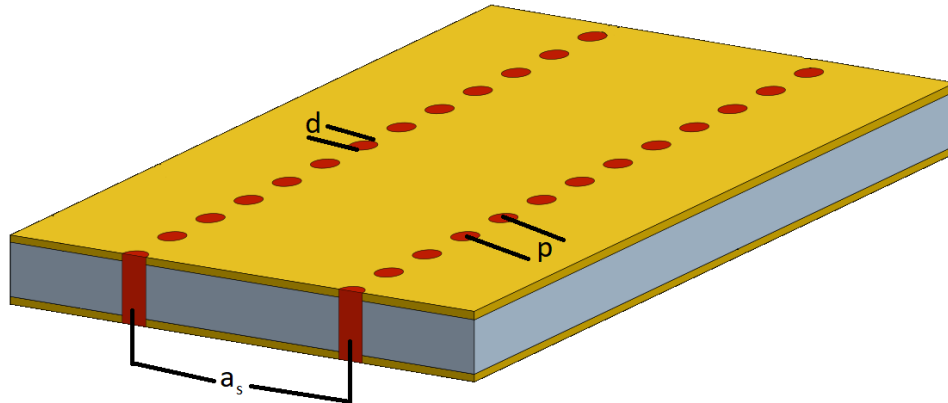


Figura 8: Esquemático de una SIW.

Como describíamos en el anterior capítulo, la SIW se compone de un sustrato colocado entre dos capas de metal, en el cual se disponen unas vías metálicas de diámetro ( $d$ ) con una separación entre ellas ( $p$ ). La onda viajara confinada entre las vías. Para poder calcular los parámetros correspondientes nos basaremos en diversos artículos [8] donde especifican una serie de reglas de diseño cuyas variables deben cumplir ciertas condiciones. Estas son las ecuaciones:

$$a_d = \frac{a}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad [4]$$

Donde  $a$  sería la anchura que debería tener la guía de onda convencional. Esta anchura la necesitamos para calcular finalmente nuestro parámetro  $a_s$ .

$$a_s = a_d + \frac{d^2}{0.95p} \quad [5]$$

Donde  $a_s$  sería la anchura de nuestra SIW,  $p$  sería la distancia entre las vías, y  $d$  sería el diámetro de las vías.  $d$  y  $p$  también tendrán que cumplir las siguientes condiciones [8].

$$d < \frac{\lambda_g}{5} \quad [6]$$

$$p \leq 2d \quad [7]$$

Aquí vemos un dibujo explicativo donde se ve la equivalencia entre la guía de onda con un dieléctrico y la SIW.

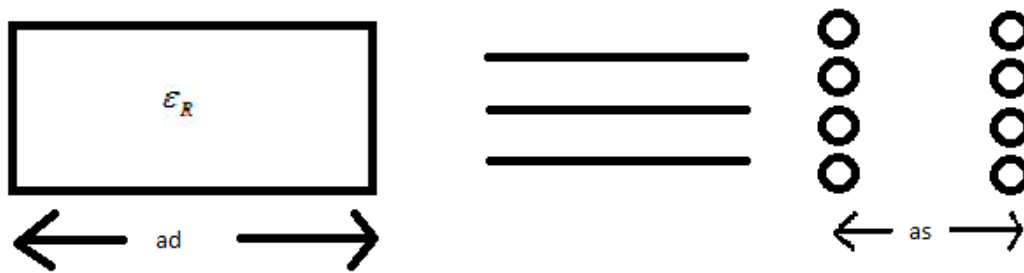


Figura 9: Equivalencia de una guía de onda con una SIW.

Teniendo en cuenta que la frecuencia de interés es de 24 GHz y que debemos basar nuestros primeros datos en un modelo equivalente de guía de onda, usaremos el valor a como el valor estándar de una guía WR34.

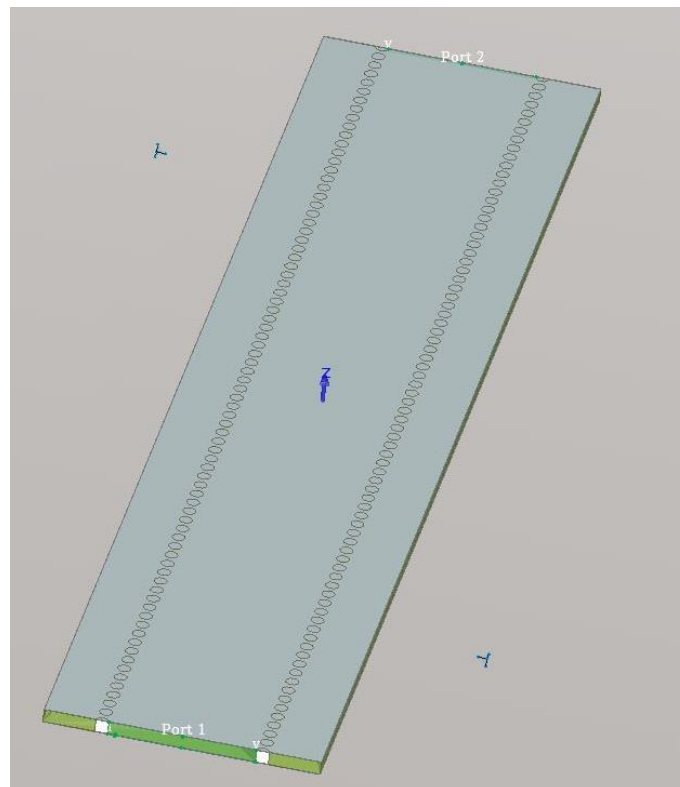


Figura 10: SIW en EMPro.

Puesto que podemos ver su respuesta en frecuencia, podremos optimizar los valores iniciales hasta conseguir una respuesta mejorada. Pero siempre cumpliendo las reglas de diseño citadas anteriormente.



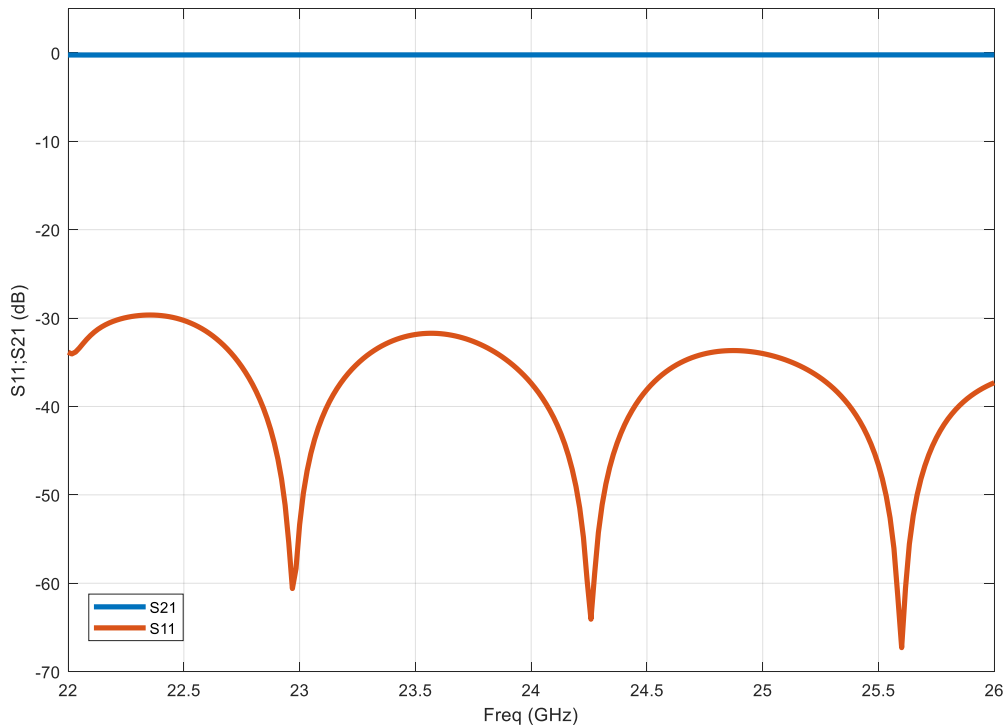


Figura 11: Respuesta en frecuencia del resultado de simular la figura 10.

Hemos mejorado las primeras respuestas usando los nuevos valores optimizados. Esta estructura será la base principal donde empezaremos a realizar las modificaciones oportunas para conseguir que se comporte como una antena. Además de estos valores, un parámetro muy importante a calcular es la longitud de onda en la guía, ya que la necesitaremos a la hora de realizar la antena. Finalmente hemos llegado a la obtención de estos parámetros, expuestos en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor	Condición cumplida
$a_s$	6.19 mm	[2]
$d$	0.5 mm	[3] Si, cumple la condición
$p$	0.7 mm	[4] Si, cumple la condición

Tabla 1: Dimensiones de los principales parámetros.

Cabe destacar que hemos usado un sustrato Rogers 5880 de grosor 0.508 mm, del que disponemos en el laboratorio, con permitividad relativa 2.2.

## 2.2 Calculo de la longitud de onda en la guía

Como hemos mencionado anteriormente, la longitud de onda en la guía es importante, tanto a la hora de cumplir las condiciones de diseño con las ecuaciones [3][4], y también para el diseño de la antena, ya que necesitaremos calcular la última ranura con una

separación de  $\frac{\lambda_g}{4}$  del final de la SIW y las otras ranuras a una separación de  $\frac{\lambda_g}{2}$ . Para calcular la longitud de onda de la guía, haremos un cálculo teórico, y otro práctico, basado en los datos obtenidos de la simulación de esta estructura:

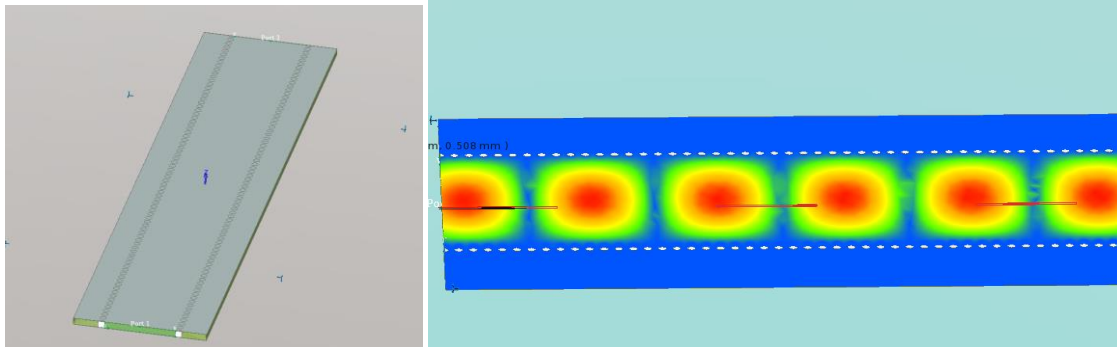


Figura 12: El campo electromagnético propagándose por la SIW.

Para el cálculo teórico, usaremos esta fórmula, correspondiente a una guía rectangular rellena de dieléctrico:

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\epsilon_r(2\pi f)^2}{c^2} - \left(\frac{\pi}{a'}\right)^2}} \quad [8]$$

Siendo  $a'$  la anchura de la SIW,  $\epsilon_r$  la constante dieléctrica del medio,  $f$  la frecuencia de operación, y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío. Teniendo en consideración que la  $a' = a_s - d = 5.69$  mm obtenemos un valor de  $\lambda_g = 12.51$  mm

Para el cálculo práctico usaremos los datos obtenidos de la simulación de la estructura mostrada abajo, y aplicaremos los valores en las siguientes fórmulas: usando la fase del S21 y la constante de fase, tendremos la longitud de onda en la guía.

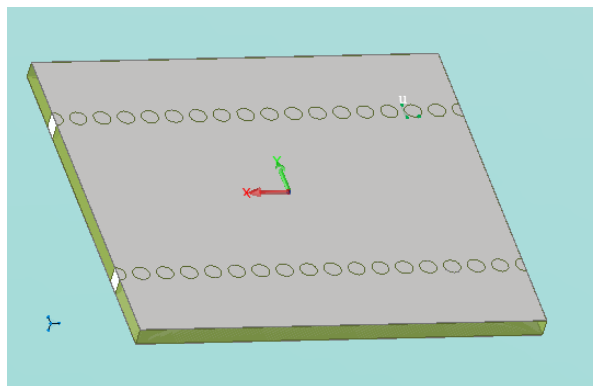


Figura 13: Trozo de guía SIW de una longitud determinada para el cálculo de la longitud de onda práctico.

Aplicaremos estas igualdades para obtenerla,  $\phi = \beta * d \rightarrow \beta = \phi/d$  ;  $\beta = 2\pi/\lambda_g$ ;

Donde  $d$  es la distancia en largo de la estructura, en este caso, la distancia es muy larga y habría que realizar un “unwrap” para poner la fase correcta. De esta forma obtenemos una  $\lambda_g = 12.19$  mm

También podemos usar la constante de propagación que nos da la simulación  $K=502.658$ , y obtenemos:  $\lambda_g = 12.49$  mm

Una vez obtenido el resultado de la longitud de onda en la guía, vemos que el segundo cálculo práctico se aproxima al teórico, eso es porque la simulación nos está calculando la constante de propagación a la entrada de la SIW, como si fuera la entrada rectangular en una guía convencional, por tanto, nos tendremos que fijar más del primer cálculo práctico, que es más real.



## Capítulo 3. SIW como antena de guía ranurada

### 3.1. Cálculo de la conductancia

Seguimos el mismo principio que una SWA, realizaremos una ranura longitudinal en la pared de la guía e iremos modificándola hasta conseguir que se comporte como un slot resonante, es decir que solo genere parte resistiva y su parte reactiva sea nula. Para encontrar un valor aproximado con el que podamos empezar usaremos esta regla de diseño.

Partiendo de la base:

$$L_{slot\_resonante} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{eficaz}}} \quad [9]$$

	SWA (aire)	SIW (sustrato)
$\epsilon_{eficaz}$	$\epsilon_{eficaz} = 1$	$\epsilon_{eficaz} = \frac{1 + \epsilon_r}{2}$

Tabla 2: Cálculo para la permitividad efectiva en la SIW.

Como podemos comprobar, usamos una media de la permitividad relativa de los dos medios, con el fin de conseguir un modelo aproximado.

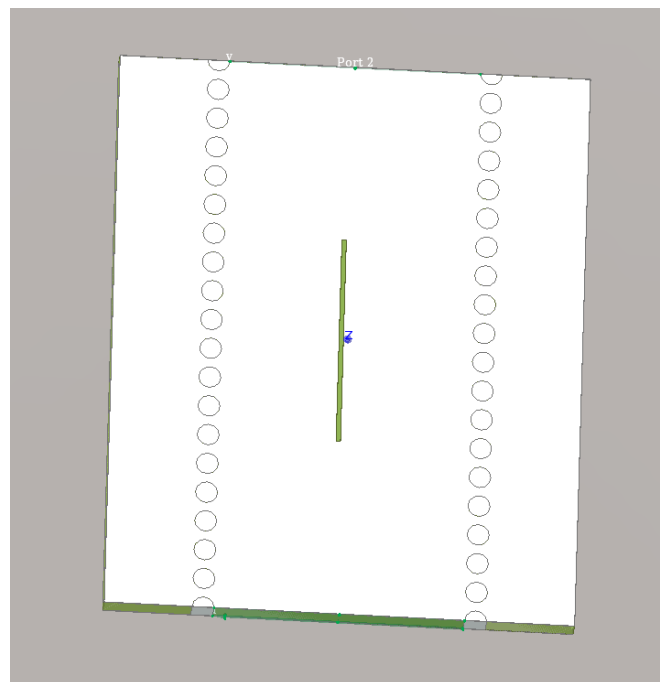


Figura 14: Estructura de la SIW con una ranura para el cálculo de la conductancia.

Ahora modificamos el valor de la longitud poco a poco hasta conseguir que la ranura se comporte de forma resonante. En la siguiente gráfica podemos ver diferentes resultados según la longitud usada.

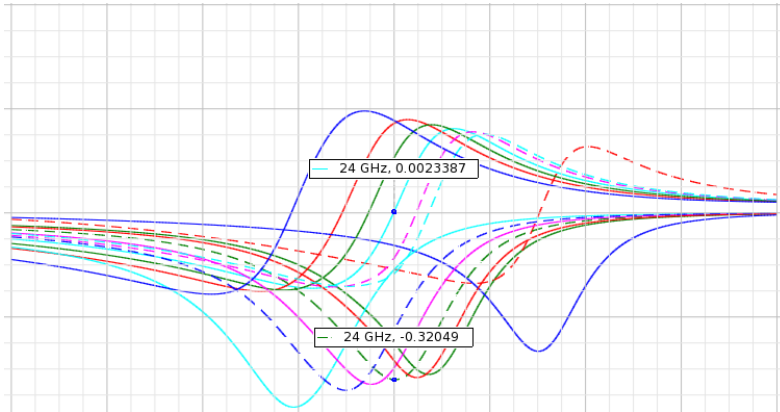


Figura 15: Diferentes valores de la respuesta del S11 (real e imaginario) al variar la longitud y distancia de la ranura.

Una vez encontrado el valor adecuado, resolveremos las ecuaciones detalladas en el primer capítulo [1,2 y 3] teniendo en cuenta que como hemos comentado, el diseño está basado en una antena de 8 ranuras con distribución uniforme. El valor de conductancia de cada ranura obtenido es de 1/8.

Usando la ecuación siguiente:

$$G = \frac{-2S_{11}}{1 + S_{11}} \quad [10]$$

Determinamos que el valor real del S11 que debemos tener para obtener una conductancia de 0.125 Siemens es de  $S_{11} = -0.0588$ . Primer simulamos la estructura, variando la distancia del slot, y aplicamos la fórmula [10]. Con esto obtenemos la gráfica de la conductancia que mostramos a continuación.

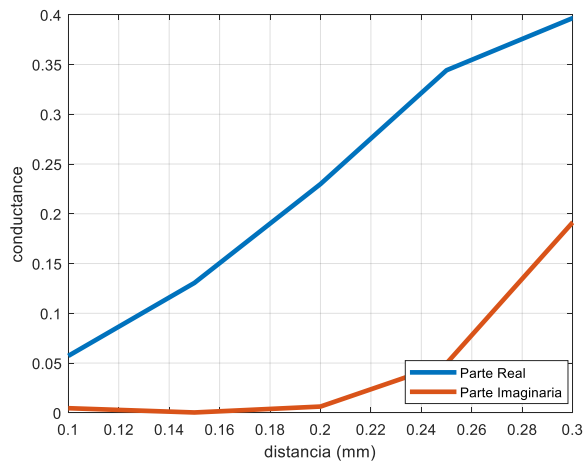


Figura 16: Curva de la conductancia

Es importante que la parte imaginaria sea nula, ya que eso marcará la condición para tener un slot resonante. Una vez encontrada la distancia donde cumplimos que la conductancia sea  $1/8$  veremos su respuesta  $S_{11}$  en el eje de frecuencias. En la gráfica de la izquierda mostramos el  $S_{11}$  (parte real e imaginaria) y en la gráfica de la derecha mostramos la conductancia a partir de la formula citada usando los datos anteriores

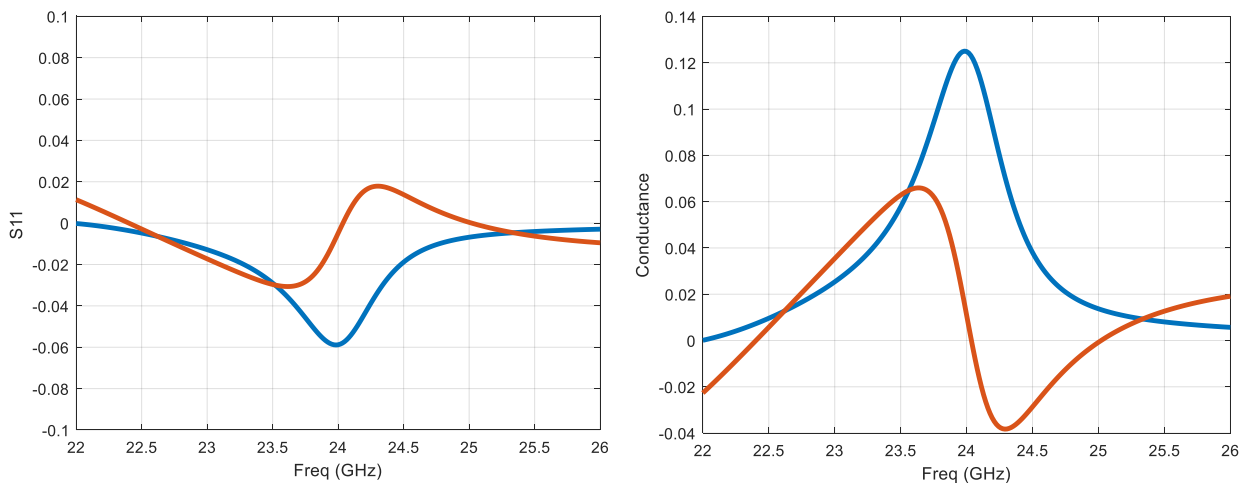


Figura 17:  $S_{11}$  (real=azul, imaginaria=roja) (Izda.); Conductancia (real=azul, imaginaria=roja) (Dcha.)

Ya hemos encontrado la longitud de ranura resonante y la distancia correcta para la cual se generará una conductancia de 0.125. Una vez encontrada procederemos a dibujar la antena.

### 3.2. Diseño de la Antena

Para conseguir que la antena radie, deberemos colocar al final de la guía SIW ranurada un cortocircuito que hará que la onda que incide se refleje. Las ranuras colocadas se comportarán como impedancias o admitancias (aunque trabajaremos con admitancias, por simplificar cálculos), y la suma total de ellas será la admitancia total, cuya inversa será la impedancia de “carga” que deberá ser igual a la impedancia característica de la guía. Con esto conseguimos un coeficiente de reflexión de 0 que es equivalente a decir que no se producen reflexiones a lo largo de la guía, se tendría una relación de onda estacionaria de 1.

La colocación de la última ranura será la longitud de onda en la guía dividida entre 4, y a partir de esa ranura, la distancia entre ellas será la mitad de la longitud de onda en la guía, de forma similar a una SWA convencional.

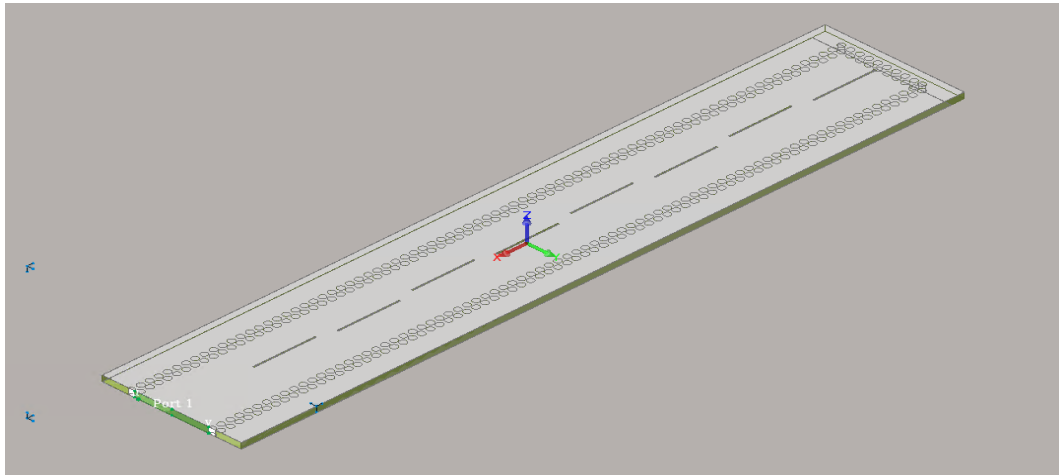


Figura 18: Antena SIW preparada para simular.

La posición de cada ranura con respecto al centro de la guía viene dada por la distribución que deseamos obtener. En este primer caso elegimos una distribución uniforme, por lo que las ranuras se colocarán a la misma distancia. Una vez simulada la estructura analizaremos y mostraremos los resultados más relevantes que son la respuesta en frecuencia del S11 y los planos del diagrama de radiación, tanto el E y H como las componentes Cross-Polar y Co-Polar.

Aquí mostramos la respuesta del S11 que viene dada por el coeficiente de reflexión. Nosotros buscamos la adaptación en torno a la frecuencia de 24 GHz y por lo que podemos concluir, tenemos la antena adaptada.

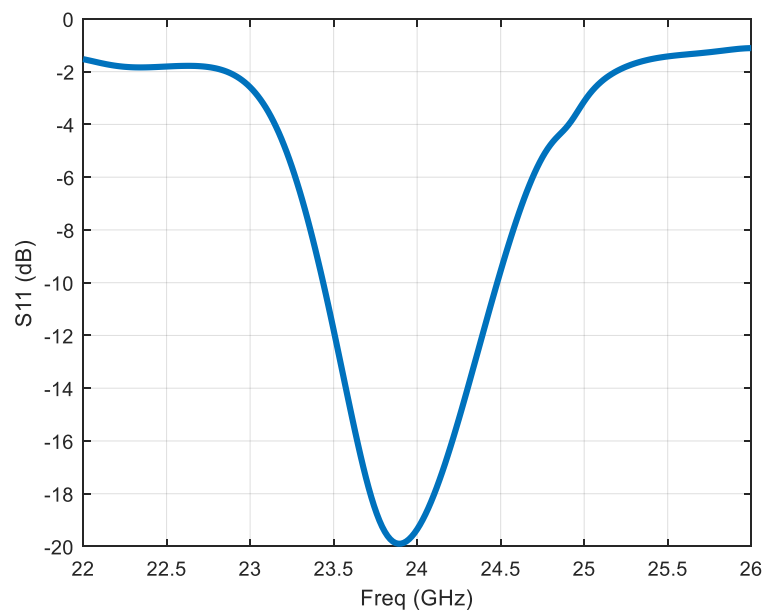


Figura 19: S11 de la antena SIW simulada.

Para poder hacer futuras comparaciones sacaremos el porcentaje de ancho de banda. Pondremos el umbral en -10 dB, y tendremos un 4.4% de ancho de banda. Si comparamos este dato con los obtenidos en [7] vemos que es similar. Es sabido que las



antenas ranuradas en guía a mayor número de ranuras su ancho de banda se ve reducido ya que se basan en la VSWR para resonar. A continuación, mostramos los cortes H, E y CX para 45°.

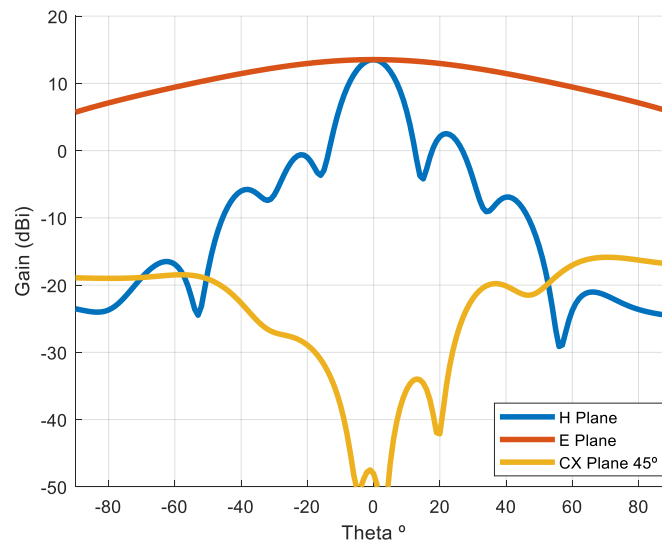


Figura 20: Diagrama de radiación, Planos E, H y Cross-Polar

Vemos como el diagrama es más estrecho en el plano H, y más ancho en el plano E, procedemos a sacar los diferentes cortes que resultan de interés. También obtenemos la ganancia que tiene nuestra antena de 13.5 dB. Podemos calcular la eficiencia de apertura que en este caso es de 68,67%. A continuación, se colocará una metasuperficie en cada ranura para incrementar el área efectiva, mejorando así la ganancia.



## Capítulo 4. Implementación de la metasuperficie.

Una vez realizado el diseño de la antena SIW, procederemos a añadirle la metasuperficie sobre las ranuras, con lo que se esperará que el diagrama de radiación mejore, y se obtenga más ganancia. La metasuperficie es la siguiente, y su funcionamiento está explicado en [9].

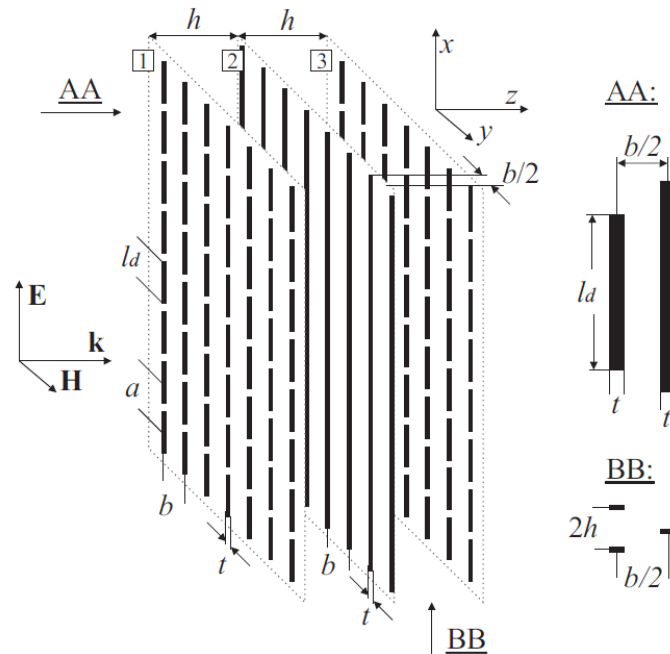


Figura 21: Esquemático de la metasuperficie empleada.

En trabajos anteriores [7] teníamos el diseño para una frecuencia de 76GHz, esta vez tendremos que rediseñarla y escalarla a la frecuencia de interés de 24GHz. Podríamos hacer un re-escalado a la frecuencia de operación, pero debido a que los materiales que disponemos tienen grosores concretos, intentaremos conseguir la misma respuesta en frecuencia, pero usando esos materiales ya disponibles en el laboratorio.

### 4.1. AJUSTE DE LA METASUPERFICIE

Se tiene la metasuperficie configurada para una frecuencia de 76 GHz, se necesita reconfigurarla a 24 GHz, ya que como hemos dicho en los objetivos, esa banda de frecuencia está teniendo un gran interés en el desarrollo radar.

Realizaremos una implementación en Ansys HFSS. Para dibujar la estructura, utilizaremos una configuración de Master-Slave en las caras de nuestra metasuperficie, de esta manera, el software interpretará nuestro modelo como periódico. Le introduciremos una excitación a modo de onda plana incidente y podremos ver su

respuesta en frecuencia, tanto el S11 y S21 de los dos modos que introduciremos en la metasuperficie.

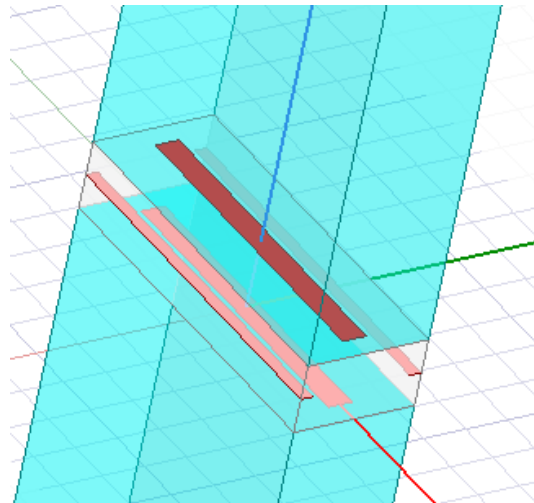


Figura 22: Celda unidad de la metasuperficie en Ansys HFSS.

Al simular obtenemos esta respuesta, donde podemos ver que la estructura en la banda de frecuencia de interés se comporta como un paso todo, y fuera de esa banda, actúa como filtro, es decir, se comporta como un filtro paso banda. Esta figura la podemos apreciar en el artículo ya citado [9] concretamente en la figura 10. Claramente los picos observados son consecuencia de los “wires” que incrementan el ancho de banda, originando otra frecuencia de resonancia.

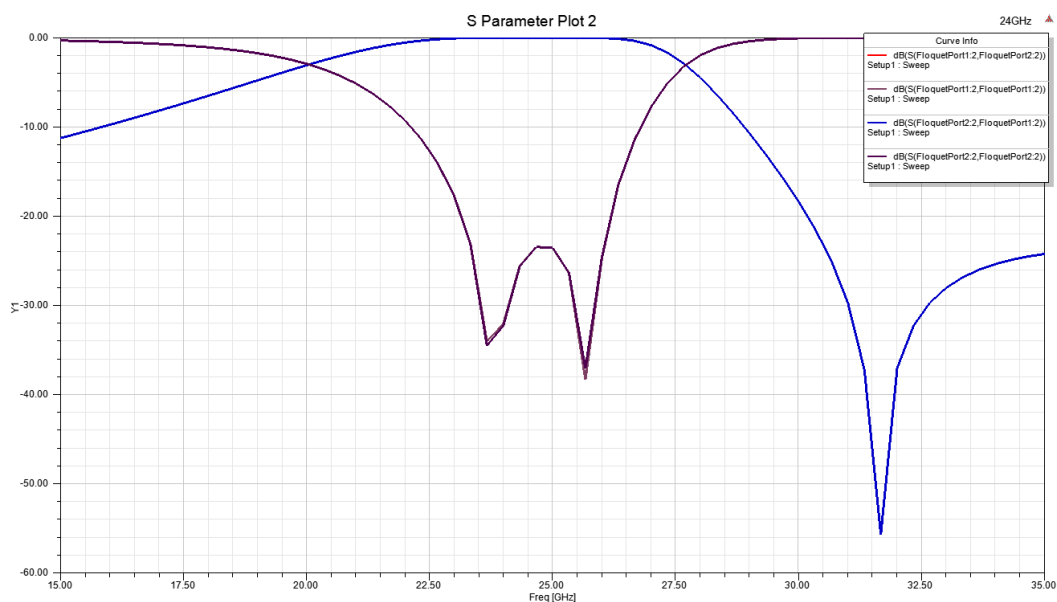


Figura 23: Respuesta en frecuencia de nuestra celda unidad escalada a 24 GHz..

Pero, debido al ajuste, se llegan a medidas de sustrato que no están disponibles, por lo que se hace difícil su fabricación. Concretamente se llega a una medida de grosor de sustrato de 0.4071 mm. Como solución, se realiza una simulación con el grosor aconsejado de 0.508 mm del cual se dispone en el laboratorio. Al realizar el ajuste se

obtiene la respuesta que se muestra en la figura 24, donde se ve claramente que las resonancias han dejado de tener tanta influencia. Aun así, se aprecia la banda que deja pasar nuestra estructura.

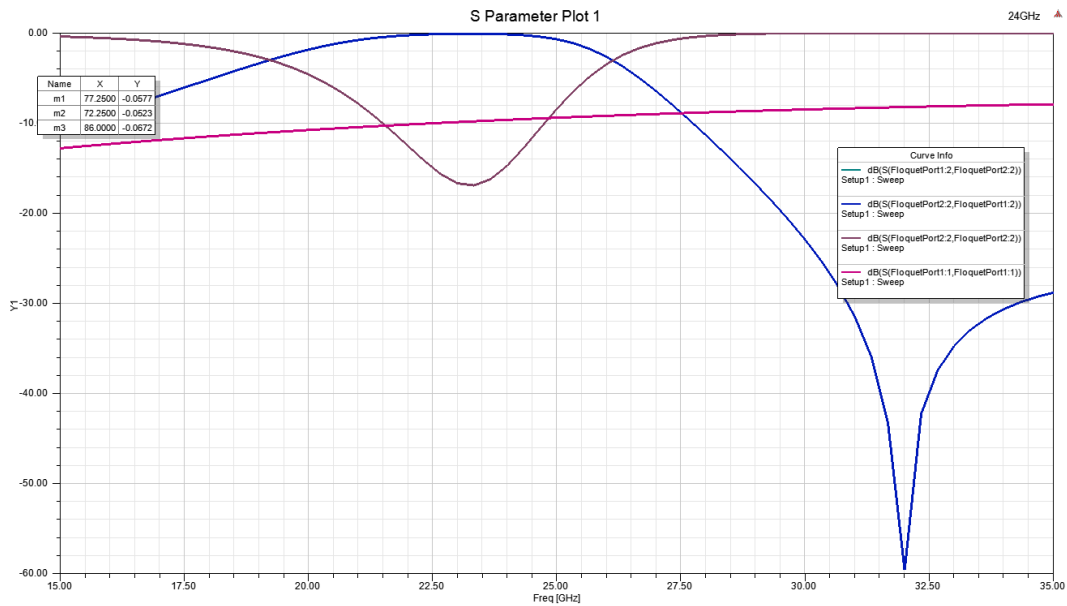


Figura 24: Respuesta en frecuencia de nuestra celda unidad con grosor de sustrato de 0.508 mm.

Parece que el cambio de grosor ha implicado un brusco cambio en la respuesta, aunque utilizando el grosor de 0.381 mm del cual la empresa Rogers provee, tenemos de nuevo la respuesta con esos dos picos de resonancia (figura 25), esto es porque este grosor está cerca del grosor que nos salía al escalar la metasuperficie (0.4071 mm). El problema es que, como ya hemos mencionado, solo tenemos en el laboratorio el sustrato con 0.508 mm grosor.

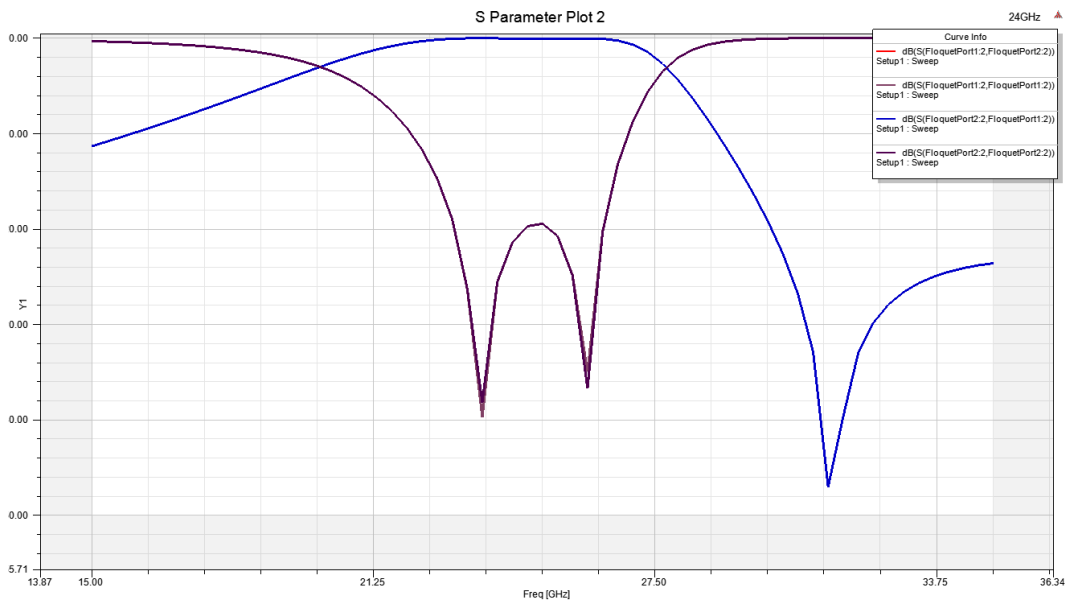


Figura 25: Respuesta en frecuencia de nuestra celda unidad con grosor de sustrato de 0.381 mm.

Para resolver este problema, se decide optimizar los parámetros ajustables de la metasuperficie, dejando el grosor del Rogers a 0.508 mm. También introducimos grosor a los dipolos y wires de la estructura, ya que se ve que cuando se simula considerando que son láminas de grosor 0, la respuesta es mucho mejor, y se aleja de la realidad cuando se tiene en consideración el grosor real. En la figura 26 se muestra la respuesta ya ajustada y optimizada.

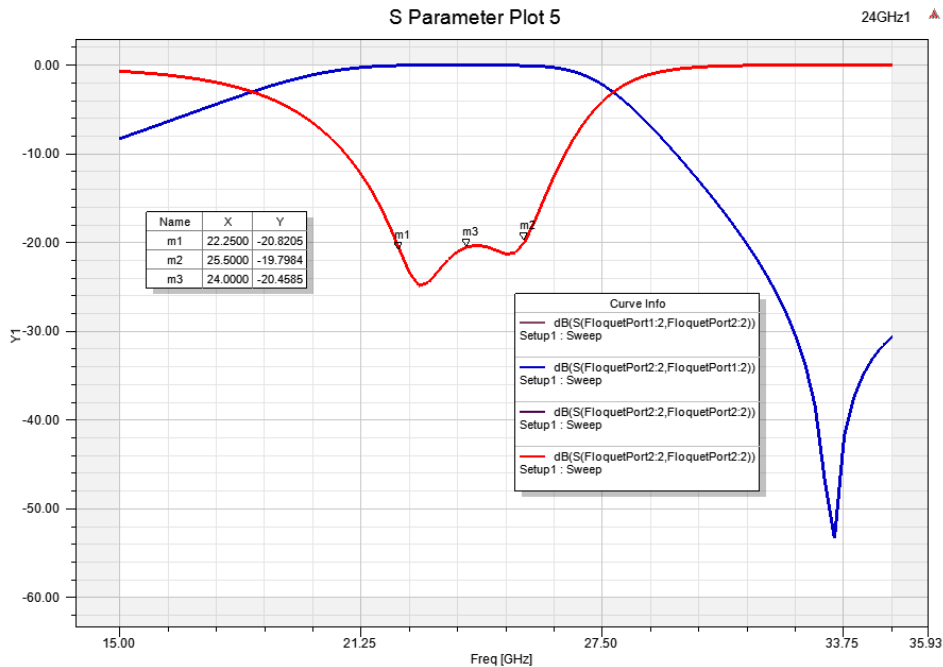


Figura 26: Respuesta en frecuencia de nuestra celda unidad con materiales disponibles en el laboratorio.

Una vez conseguido el reajuste, diseñaremos una estructura con una ranura para el cálculo de la conductancia. Durante el proceso de diseño de la antena, nos fijamos que debido a que la longitud de onda en la guía las ranuras quedan muy próximas entre sí, haciendo que la metasuperficie no llegue a solaparse con la contigua, pero sí que afecte en el correcto funcionamiento de esta. Aquí se muestra el problema:

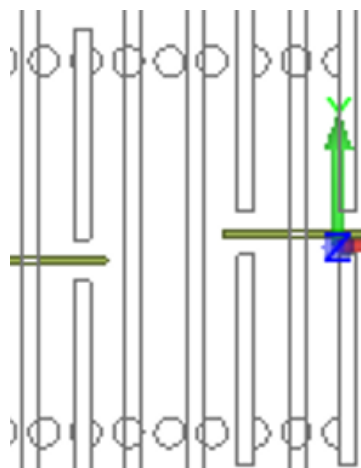


Figura 27: Disposición de la metasuperficie en las ranuras.

Debido a esto, se pretende volver a ajustar la metasuperficie, pero esta vez limitando la variable de separación entre dipolos. No hemos llegado a obtener los dos picos de resonancia, pero si el mínimo en 24 GHz, es decir en nuestra frecuencia de operación, por lo que damos por válido las variables usadas y nos disponemos a reestructurar la antena, y a calcular la conductancia. A continuación, muestro la respuesta en frecuencia de la metasuperficie final.

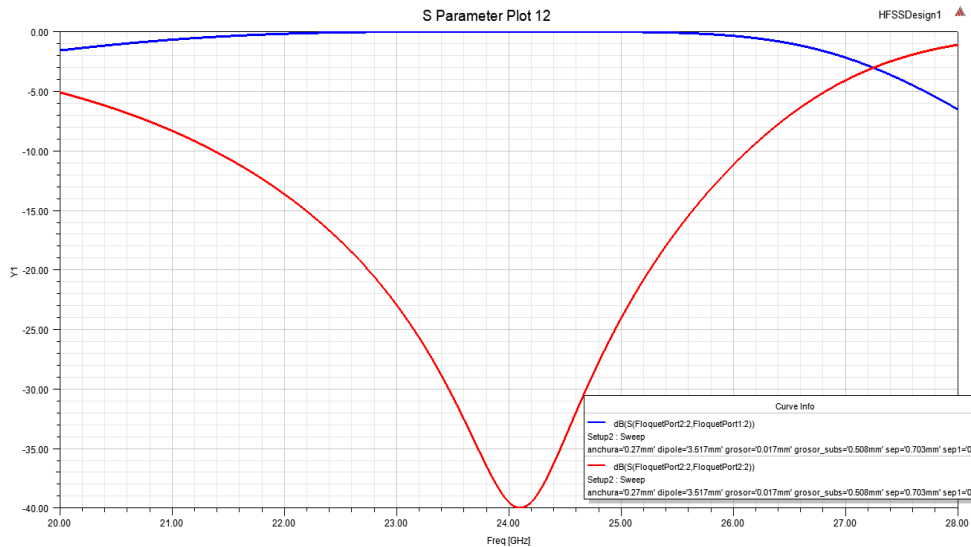


Figura 28: Respuesta en frecuencia de nuestra celda unidad de la metasuperficie ya optimizada.

#### 4.2. Cálculo de la conductancia

Seguiremos el mismo procedimiento usado anteriormente para calcular la conductancia, pero esta vez, encima de la ranura colocaremos la metasuperficie. Emplazamos perpendicularmente la metasuperficie a la ranura, ya que el campo eléctrico incidirá a los dipolos de manera transversal. En esta esquemático se muestra claramente la disposición de la metasuperficie sobre la ranura, y como se orientan los distintos campos.

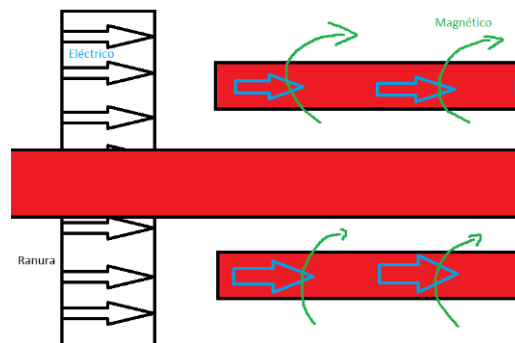


Figura 29: Esquemático de la colocación de la metasuperficie sobre la ranura.

A continuación, mostramos la estructura que simularemos:

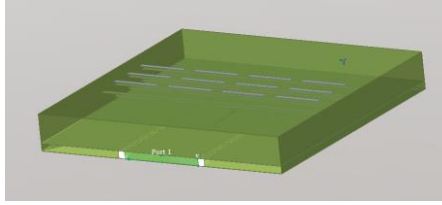


Figura 30: Estructura de la SIW MTM, con una ranura para el cálculo de la conductancia.

Debido a la colocación de la metasuperficie, tendremos que encontrar de nuevo la longitud de ranura adecuada para que resuene. Esta vez aplicaremos la misma fórmula usada en el capítulo anterior, solo que cambiaremos la  $\epsilon_r$  del aire 1, a 2.2 porque después de la ranura seguimos teniendo sustrato.

Partiendo de la base:

$$L_{slot\_resonante} = \frac{\lambda_o}{2\sqrt{\epsilon_{eficaz}}} \quad [11]$$

	SWA (aire)	SIW (sustrato)
$\epsilon_{eficaz}$	$\epsilon_{eficaz} = 1$	$\epsilon_{eficaz} = \frac{2.2 + \epsilon_r}{2}$

Tabla 3: Cálculo para la permitividad efectiva en la SIW MTM.

$L_{slot\_resonante} = 4.2137 \text{ mm}$  frente a los 4.9 mm que teníamos sin la metasuperficie. En [5] vemos como al poner la metasuperficie sobre una SWA la dimensión de la ranura es menor que la ranura que teníamos al principio para la SWA tradicional. Aquí es equivalente también. Primer simulamos la estructura de la figura 27, variando la distancia del slot, y aplicamos la formula [10]. Con esto obtenemos la gráfica de la conductancia que mostramos a continuación.

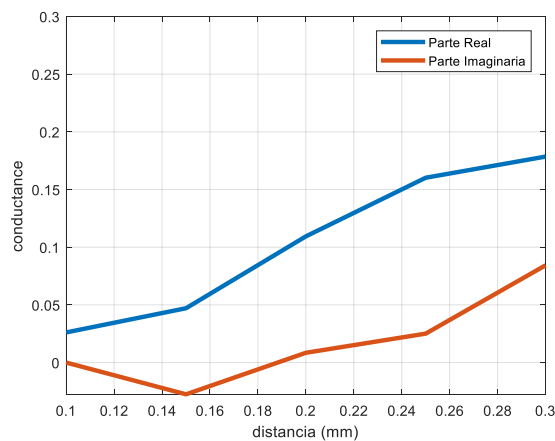


Figura 31: Curva de la conductancia.



Una vez visto la curva buscamos el valor de  $1/8$  que necesitamos para que la antena este adaptada y encontramos ese valor en torno a 0.21 mm, con eso simulamos y sacamos los siguientes resultados. En la gráfica de la izquierda mostramos el S11 (parte real e imaginaria) y en la gráfica de la derecha mostramos la conductancia a partir de la fórmula [10] usando los datos anteriores.

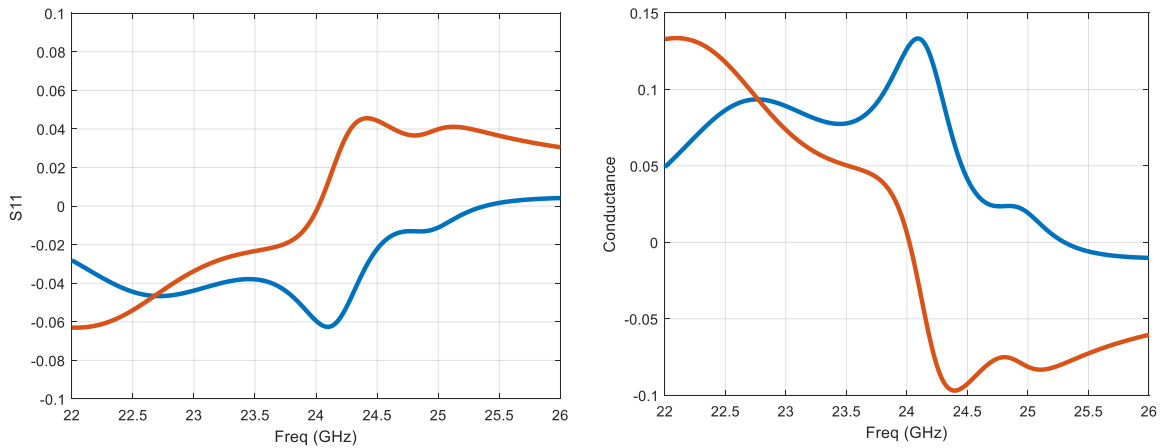


Figura 32: S11 (real=azul, imaginaria=roja) (Izda.); Conductancia (real=azul, imaginaria=roja) (Dcha.)

Vemos como la parte imaginaria en 24 GHz se sitúa cercana al cero, y la parte real es de 0.125 Siemens. Estas gráficas son para una distancia de ranura de 0.225 mm y una longitud del slot de 4.175 mm, por lo que teniendo ya las dimensiones del slot resonante y donde situarlo, pasaremos a dibujar la antena.

### 4.3. Diseño de la Antena con la metasuperficie

Se usa el mismo proceso seguido en el anterior capítulo, pero esta vez situando la metasuperficie encima de las ranuras. En la siguiente figura mostramos la figura de cómo quedaría la estructura que simularemos.

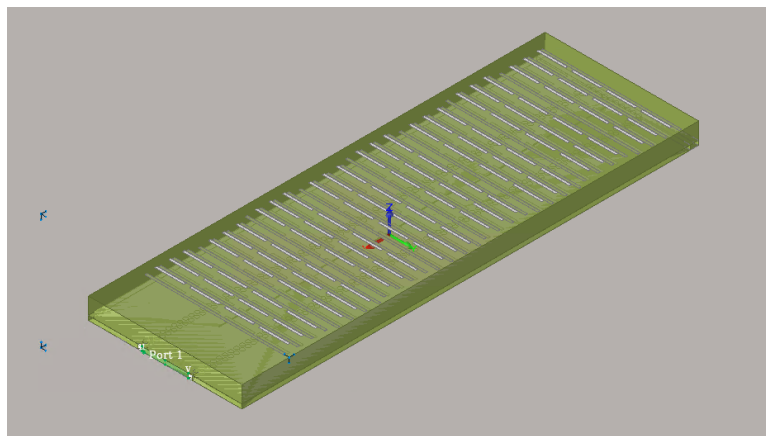


Figura 33: Antena SIW MTM preprada para simular.

Aquí mostramos la respuesta del S11 que viene dada por el coeficiente de reflexión. Nosotros buscamos la adaptación en torno a la frecuencia de 24 GHz y por lo que podemos concluir, tenemos la antena adaptada.

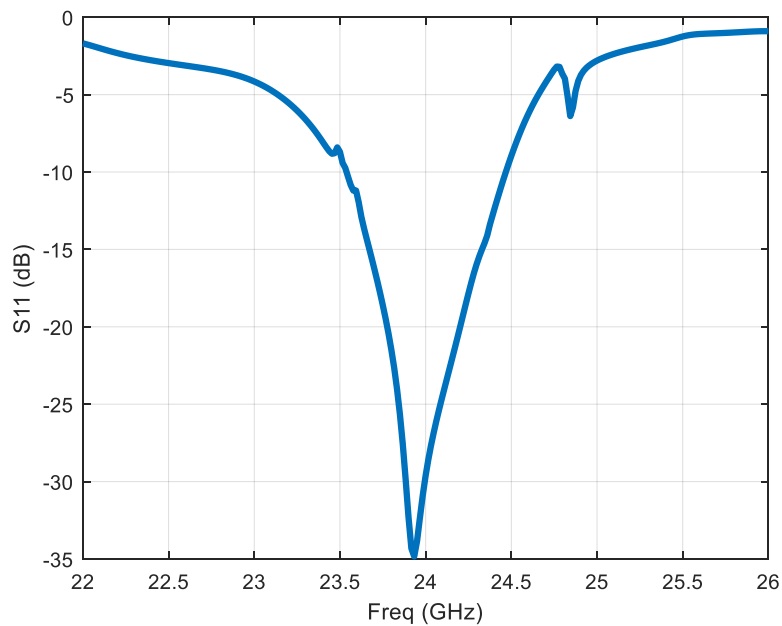


Figura 34: S11 de la antena SIW MTM simulada.

Para poder hacer futuras comparaciones sacaremos el porcentaje de ancho de banda. Pondremos el umbral en -10 dB, y tendremos un 4.15% de ancho de banda. A continuación, mostramos los cortes H, E y CX para 45°.

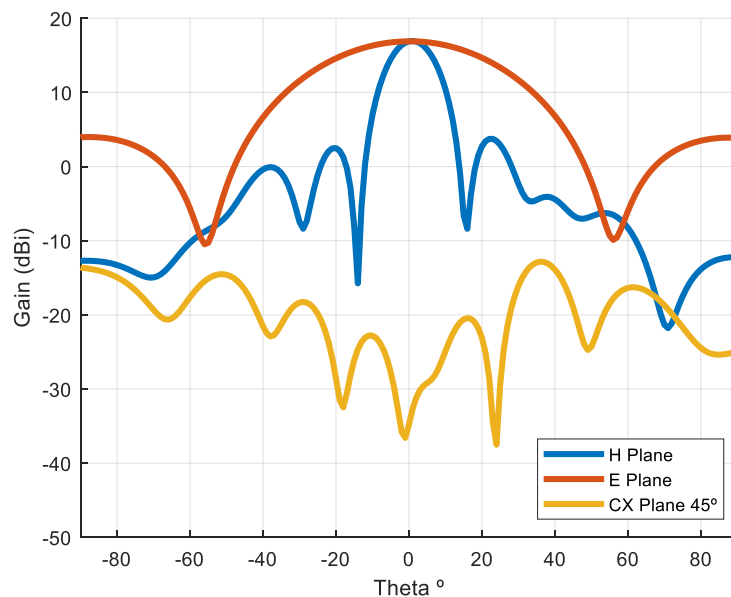


Figura 35: Diagrama de radiación, Planos E, H y Cross-Polar.

Vemos como el diagrama es más estrecho en el plano H, y más ancho en el plano E. En esta grafica se observa la ganancia que tiene nuestra antena de 16.9 dB. Podemos calcular la eficiencia de apertura que en este caso es de 57,37%.

## Capítulo 5. Comparaciones

En este capítulo vamos a comparar los resultados de las dos antenas diseñadas. Analizaremos el S11 de ambas, y sus diagramas de radiación, además de otros datos de interés como es la eficiencia de apertura.

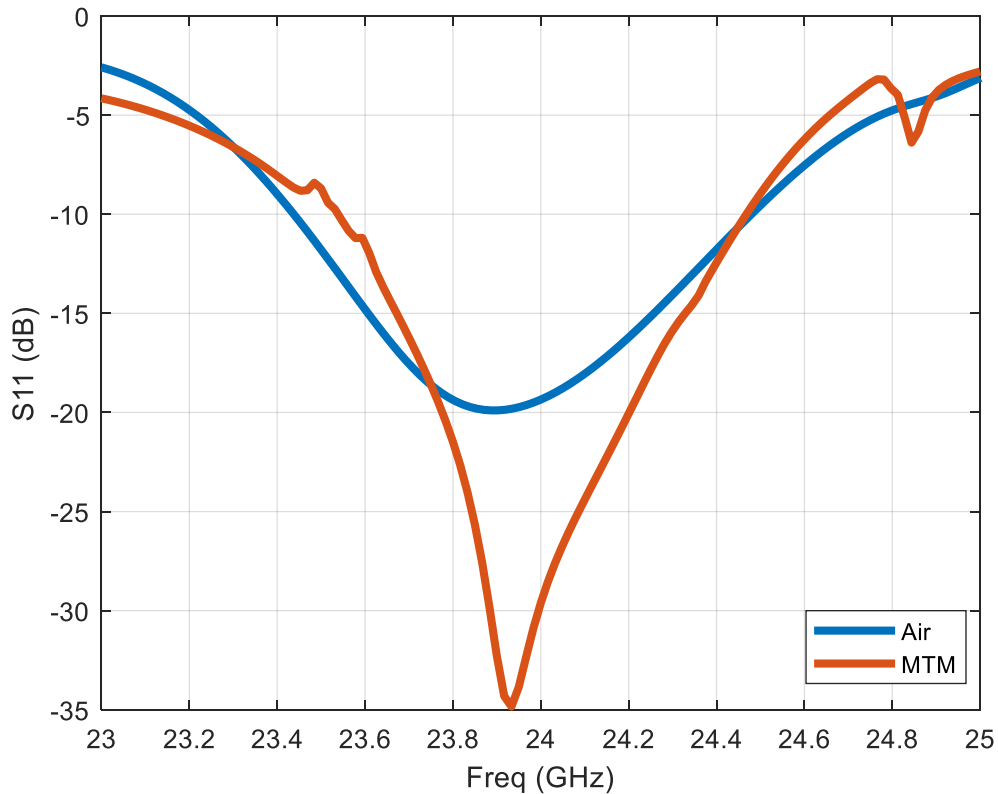


Figura 36: Comparativa del nivel de adaptación de las diferentes antenas.

Aquí mostramos la respuesta en frecuencia del S11, se aprecia que tienen el ancho de banda prácticamente parecido, un porcentaje de ancho de banda para la SIW de 4.4% y un porcentaje para la SIW con MTM de 4.15%, vemos que son prácticamente similares. Por otro lado, vemos que otra vez nos aparece un pico en torno a 24.85 GHz, esto es debido al efecto de resonancia de la metasuperficie, y se ve la misma respuesta en trabajos previos [7]. Podemos afirmar que la resonancia siempre es proporcional, ya que antes ajustábamos a la frecuencia de operación de 76.5 GHz y nos aparecía en torno a 79,5 GHz.

Frecuencia de operación (GHz)	Resonancia a frecuencia superior (GHz)
24	24.85
76.5	79.5

Tabla 4: Proporcionalidad de la resonancia que encontramos a una frecuencia superior a la de operación.

La resonancia siempre aparece con un factor multiplicativo de 1.04 a la frecuencia de operación

También podemos ver el cambio del diagrama de radiación de una antena a otra.

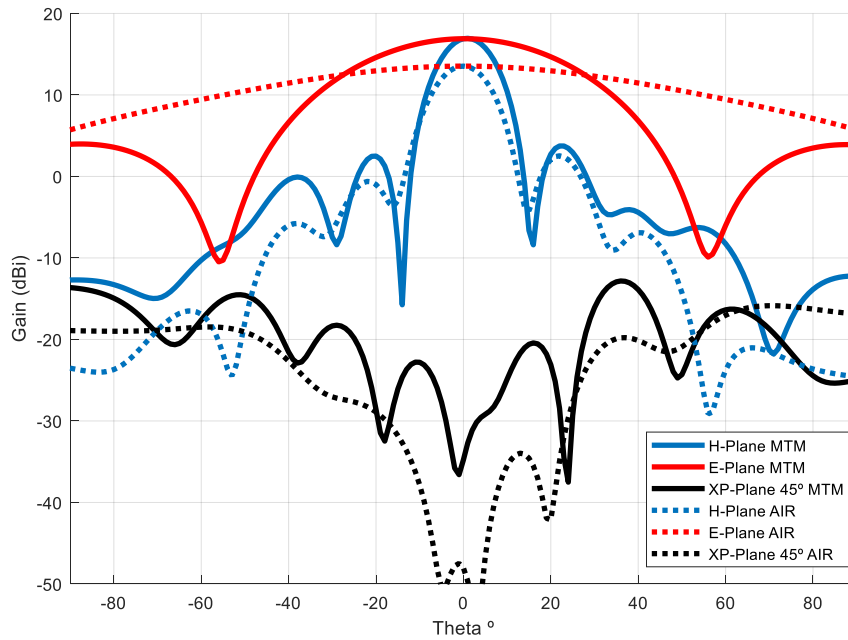


Figura 37: Comparativa de los diagramas de radiación.

Se ve como el uso de la metasuperficie hace que el plano E se estreche, pero el plano H siga igual. Esto es debido a que la metasuperficie hace que la antena tenga más dimensión, pero a lo ancho, y ese es el que determina el Plano E, por otro lado, el plano H no se ve afectado ya que viene determinado por la dimensión de la largura de la antena, que no ha cambiado a penas. El plano XP aumenta con el uso de la MTM, como ya ocurría en el caso del TFG [7]. Además de que se ve un notable aumento de ganancia que se ve mejor en la gráfica siguiente donde podemos ver la ganancia en función de la frecuencia.

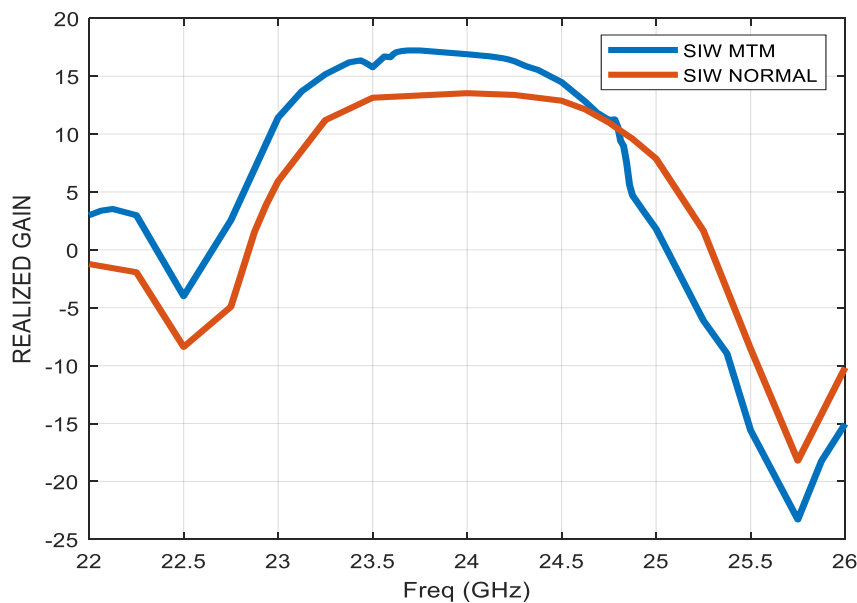


Figura 38: Comparativa de la ganancia en función de la frecuencia de las diferentes antenas.

En esta tabla comparativa mostramos las dimensiones de cada antena y la longitud y disposición de las ranuras, y analizamos la eficiencia de apertura de cada una de las antenas.

	SIW	SIW MTM
Anchura	7.29 mm	19.09 mm
Largura	55.6 mm	55.6 mm
Distancia Ranura	0.18 mm	0.225 mm
Largura Ranura	4.76 mm	4.175 mm
L_Onda_Guia	12.19 mm	12.19 mm
Ganancia	13.5 dB	16.9
Area	405 mm <sup>2</sup>	1039 mm <sup>2</sup>
A_Efectiva	278 mm <sup>2</sup>	608 mm <sup>2</sup>
Eficiencia_Apertura	68.67 %	57.37 %
Ancho de Banda	4.4 %	4.15 %
Ancho de Haz Plano E	50 °	23 °
Ancho de Haz Plano H	6.5 °	6.5 °

*Tabla 5: Comparativa de las dimensiones y de las eficiencias de las antenas.*

La eficiencia de apertura es más baja con el uso de la metasuperficie debido a que la longitud de la metasuperficie hace que aumente el ancho de 7.29 mm a 19.09 mm, aunque si bien nos hace que obtengamos una ganancia de 3.4 dB más.



## Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras

En este trabajo, se ha diseñado una antena de guía SIW ranurada cubierta con una metasuperficie, para obtener una antena que, comparada con una antena de guía SIW ranurada, es claramente mejor. Queda demostrado que el uso de la metasuperficie mejora significativamente el diagrama de radiación de la antena.

A lo largo de este estudio, hemos analizado las SIW, desde el aprendizaje para diseñarlas siguiendo las reglas hasta llegar a la antena convencional y colocarle la metasuperficie para su posterior caracterización. A continuación, se presentan algunas conclusiones y otras vías de estudio que se podrían realizar a partir de algunos puntos de este trabajo.

### 6.1. Conclusiones

Como hemos podido observar, se nota que hay una clara mejora en el diagrama de radiación cuando usamos la metasuperficie. Y tampoco se reduce el ancho de banda, por lo que puede ser una buena opción en tecnologías donde el espacio puede ser importante y se necesite una directividad superior sin empeorar el BW. Si que es cierto que el uso de la MTM involucra que aumente el ancho de la antena, como se indica en la tabla 4, pero es mejor que colocar dos antenas SIW convencionales ya que también supondría un aumento de tamaño, por consiguiente, aumento en el coste. Otro posible problema sería la potencia acoplada de una antena a otra que empeoraría la señal, y la pérdida de potencia de un puerto a otro, ya que se necesitaría usar un divisor, lo cual incrementaría de nuevo el coste.

Por tanto, concluimos que, si se tiene un área limitada y se necesita una cierta directividad, sin duda alguna con el uso de la metasuperficie podemos cumplir esos requisitos, y sin verse afectado el ancho de banda.

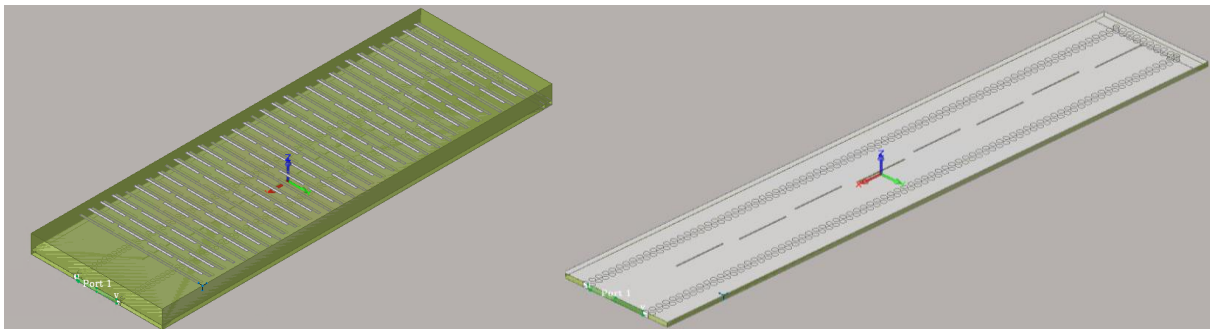


Figura 39: Las dos diferentes antenas realizadas durante el trabajo, SIW-MTM (Izq.); SIW (dcha.).

## 6.2. Líneas futuras

Como futuras propuestas podemos incluir la fabricación de las dos antenas, y su posterior medida y caracterización para ver su correcto funcionamiento, ya que disponemos de un equipo a medida en las instalaciones de la universidad

También se puede cambiar la distribución uniforme por una distribución diferente, por ejemplo, de Chebyshev ya que nos permitiría controlar los SideLobe Level (SLL), que como podemos ver en la gráfica 8 son de 15 dB.

Una mejora para esta antena también podría ser el aumento del ancho de banda mediante técnicas de resonancia diferentes, es decir, que la mitad de las ranuras tengan una resonancia en una frecuencia inferior a la de operación y la otra mitad una resonancia en una frecuencia superior, esto permitiría mejorar el ancho de banda, como podemos ver en el artículo [10], donde lo prueban en una SWA y que en una SIW debería funcionar.

Finalmente, otra posibilidad interesante sería la realización de una "Filtenna" (el filtro incluido en la antena SIW con MTM). Puede ser de especial estudio ya que es más sencillo la fabricación de los filtros en tecnología SIW que en guía de onda, y por lo tanto más barato.



## Capítulo 7. Bibliografía

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Substrate\\_integrated\\_waveguide](https://en.wikipedia.org/wiki/Substrate_integrated_waveguide)
- [2] [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/hernandez\\_a\\_r/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo4.pdf)
- [3] Santacruz, Fabricio & Aguayo, Fausto & Ribadeneira Ramírez, Jefferson & Cherrez, Diego. (2018). Red de alimentación en tecnología SIW para redes de antenas en banda milimétrica. MASKAY. 9. 9. 10.24133/maskay.v9i1.1062.
- [4] Kumar, Arvind & Singaravelu, Raghavan. (2016). A Review: Substrate Integrated Waveguide Antennas and Arrays. 8.
- [5] V.G. Veselago, «The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ,» Sov. Phys. Uspekhi, , vol. 10, nº 4, 1968.
- [6] R. Collin, Antennas and Radiowave propagation, pp. 265-268.
- [7] J. Chocarro, I. Eterra. “[Design of slotted waveguide antenna using metasurfaces](#)” 2017
- [8] <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/substrate-integrated-waveguide>
- [9] Saenz, E & Eterra, I. & Ikonen, P & Tretyakov, S & Gonzalo, Ramón. (2007). Power transmission enhancement by means of planar meta-surfaces. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 9. S308. 10.1088/1464-4258/9/9/S05.
- [10] Pazoki, R. & Rashed-Mohassel, Jalil. (2007). Bandwidth Enhancement of Resonant Slot Array Antennas. Journal of Electromagnetic Waves and Applications - J ELECTROMAGNET WAVE APPLICAT. 21. 1177-1189. 10.1163/156939307794731178.

Imágenes:

Img 1: [https://www.researchgate.net/figure/Substrate-integrated-waveguide\\_fig1\\_328724475](https://www.researchgate.net/figure/Substrate-integrated-waveguide_fig1_328724475)

Img 2: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2179-10742017000200393&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2179-10742017000200393&script=sci_arttext)

Img 3: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-981-4560-75-7\\_57-1](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-981-4560-75-7_57-1)

Img 4: <http://www.unavarra.es/historicoActualidad/noticias?contentId=164843>

Img 5: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:SIW\\_sanstransparence.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:SIW_sanstransparence.svg)

# Ilustraciones, Graficas y Tablas.

FIGURA 1: SIW .....	9
FIGURA 2: DIVISOR EN TECNOLOGÍA SIW, PERTENECIENTE AL ARTÍCULO [8].....	9
FIGURA 3: ESTRUCTURA FSS DEL ARTICULO [8] DONDE USAN CAVIDADES EN LA SIW.....	10
FIGURA 4: FILTRO USANDO SIW (Izda.); SISTEMA DE RECEPCIÓN DONDE SE APRECIA EL USO DE SIW EN ANTENAS, FILTROS... (DCHA.) .....	10
FIGURA 5:LENTE REALIZADA CON METAMATERIALES, EN LA UPNA .....	11
FIGURA 6: ANTENA SWA CON UNA METASUPERFICIE [TFG] .....	11
FIGURA 7: MODELO DE TRANSMISIÓN DE UNA ANTENA DE GUIA RANURADA [],.....	12
FIGURA 8: ESQUEMÁTICO DE UNA SIW.....	15
FIGURA 9: EQUIVALENCIA DE UNA GUÍA DE ONDA CON UNA SIW. ....	16
FIGURA 10: SIW EN EMPRO.....	16
FIGURA 11: RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL RESULTADO DE SIMULAR LA FIGURA 4. ....	17
FIGURA 12: EL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO PROPAGÁNDOSE POR LA SIW. ....	18
FIGURA 13: TROZO DE GUÍA SIW DE UNA LONGITUD DETERMINADA PARA EL CÁLCULO DE LA LONGITUD DE ONDA PRÁCTICO. ....	18
FIGURA 14: ESTRUCTURA DE LA SIW CON UNA RANURA PARA EL CÁLCULO DE LA CONDUCTANCIA. ....	21
FIGURA 15: DIFERENTES VALORES DE LA RESPUESTA DEL S11 (REAL E IMAGINARIO) AL VARIAR LA LONGITUD Y DISTANCIA DE LA RANURA.....	22
FIGURA 16: CURVA DE LA CONDUCTANCIA .....	22
FIGURA 17: S11 (REAL=AZUL, IMAGINARIA=ROJA) (Izda.); CONDUCTANCIA (REAL=AZUL, IMAGINARIA=ROJA) (DCHA.).....	23
FIGURA 18: ANTENA SIW PREPARADA PARA SIMULAR. ....	24
FIGURA 19: S11 DE LA ANTENA SIW SIMULADA. ....	24
FIGURA 20: DIAGRAMA DE RADIACIÓN, PLANOS E, H Y CROSS-POLAR.....	25
FIGURA 21: ESQUEMÁTICO DE LA METASUPERFICIE EMPLEADA.....	27
FIGURA 22: CELDA UNIDAD DE LA METASUPERFICIE EN ANSYS HFSS.....	28
FIGURA 23: RESPUESTA EN FRECUENCIA DE NUESTRA CELDA UNIDAD ESCALADA A 24 GHZ.. ....	28
FIGURA 24: RESPUESTA EN FRECUENCIA DE NUESTRA CELDA UNIDAD CON GROSOR DE SUSTRATO DE 0.508 MM.....	29
FIGURA 25: RESPUESTA EN FRECUENCIA DE NUESTRA CELDA UNIDAD CON GROSOR DE SUSTRATO DE 0.381 MM.....	29
FIGURA 26: RESPUESTA EN FRECUENCIA DE NUESTRA CELDA UNIDAD CON MATERIALES DISPONIBLES EN EL LABORATORIO.....	30
FIGURA 27: DISPOSICIÓN DE LA METASUPERFICIE EN LAS RANURAS. ....	30
FIGURA 28: RESPUESTA EN FRECUENCIA DE NUESTRA CELDA UNIDAD DE LA METASUPERFICIE YA OPTIMIZADA.....	31
FIGURA 29: ESQUEMÁTICO DE LA COLOCACIÓN DE LA METASUPERFICIE SOBRE LA RANURA. ....	31
FIGURA 30: ESTRUCTURA DE LA SIW MTM, CON UNA RANURA PARA EL CÁLCULO DE LA CONDUCTANCIA.....	32
FIGURA 31: CURVA DE LA CONDUCTANCIA. ....	32
FIGURA 32: S11 (REAL=AZUL, IMAGINARIA=ROJA) (Izda.); CONDUCTANCIA (REAL=AZUL, IMAGINARIA=ROJA) (DCHA.).....	33
FIGURA 33: ANTENA SIW MTM PREPRADA PARA SIMULAR. ....	33
FIGURA 34: S11 DE LA ANTENA SIW MTM SIMULADA. ....	34
FIGURA 35: DIAGRAMA DE RADIACIÓN, PLANOS E, H Y CROSS-POLAR.....	34
FIGURA 36: COMPARATIVA DEL NIVEL DE ADAPTACIÓN DE LAS DIFERENTES ANTENAS.....	35
FIGURA 37: COMPARATIVA DE LOS DIAGRAMAS DE RADIACIÓN. ....	36
FIGURA 38: COMPARATIVA DE LA GANANCIA EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA DE LAS DIFERENTES ANTENAS. ....	36
FIGURA 39: LAS DOS DIFERENTES ANTENAS REALIZADAS DURANTE EL TRABAJO, SIW-MTM (Izq.); SIW (DCHA.).....	39
TABLA 1: DIMENSIONES DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS. ....	17
TABLA 2: CALCULO PARA LA PERMITIVIDAD EFECTIVA EN LA SIW.....	21
TABLA 3: CALCULO PARA LA PERMITIVIDAD EFECTIVA EN LA SIW MTM. ....	32
TABLA 4: PROPORCIONALIDAD DE LA RESONANCIA QUE ENCONTRAMOS A UNA FRECUENCIA SUPERIOR A LA DE OPERACIÓN.....	35
TABLA 5: COMPARATIVA DE LAS DIMENSIONES Y DE LAS EFICIENCIAS DE LAS ANTENAS.....	37